

Результаты публичной защиты

Дата защиты: 12 апреля 2018 г.

Соискатель: **Истомина Мария Александровна.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему: «Численное моделирование гидродинамических структур с помощью квазигазодинамического алгоритма и создание нового вычислительного ядра в открытом программном комплексе OpenFOAM».

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

На заседании председательствует – Председатель диссертационного совета, член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., профессор В.Ф. ТИШКИН.

Ученый секретарь – к.ф.-м.н. М.А. КОРНИЛИНА.

На заседании из 25 членов диссертационного совета присутствовали 20, из них 6 докторов по профилю рассматриваемой диссертации:

1. ТИШКИН В.Ф.	д.ф.-м.н.	01.01.07
2. КАЛИТКИН Н.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
3. КОРНИЛИНА М.А.	к.ф.-м.н.	05.13.18
4. АНДРЕЕВ В.Б.	д.ф.-м.н.	01.01.07
5. ВАСИЛЕВСКИЙ Ю.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
6. ГОЛОВИЗНИН В.М.	д.ф.-м.н.	01.02.05
7. ДОЛГОЛЕВА Г.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
8. ЕЛИЗАРОВА Т.Г.	д.ф.-м.н.	01.02.05
9. ЗМИТРЕНКО Н.В.	д.ф.-м.н.	01.02.05
10. КАРАМЗИН Ю.Н.	д.ф.-м.н.	01.01.07
11. КОВАЛЕВ В.Ф.	д.ф.-м.н.	05.13.18
12. КОЗЛОВ А.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
13. КОЛЕСНИЧЕНКО А.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18
14. КУЛЕШОВ А.А.	д.ф.-м.н.	05.13.18
15. ЛУЦКИЙ А.Е.	д.ф.-м.н.	01.02.05
16. МАЖУКИН В.И.	д.ф.-м.н.	05.13.18
17. ПЕТРОВ И.Б.	д.ф.-м.н.	01.02.05
18. ПОЛЯКОВ С.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
19. ШПАТАКОВСКАЯ Г.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18
20. ЯКОБОВСКИЙ М.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18

По результатам публичной защиты диссертационный совет принял следующее заключение:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.024.01, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»
(ФАНО РОССИИ)

ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 12.04.2018 № 13

о присуждении **Истоминой Марии Александровне**, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация “Численное моделирование гидродинамических структур с помощью квазигазодинамического алгоритма и создание нового вычислительного ядра в открытом программном комплексе OpenFOAM” по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 08.02.2018 (протокол № 6) диссертационным советом Д 002.024.03 на базе Федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук", 125047, Москва, Миусская пл., д.4, приказ №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель Истомина Мария Александровна, 1983 года рождения.

В 2006 году соискатель окончила кафедру математики физического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени

М.В. Ломоносова». В 2009 году окончила очную аспирантуру Института математического моделирования РАН по специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Работает научным сотрудником в отделе №16 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Кандидатская диссертация: «Численное моделирование гидродинамических структур с помощью квазигазодинамического алгоритма и создание нового вычислительного ядра в открытом программном комплексе OpenFOAM» по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» выполнена в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Научный руководитель:

Елизарова Татьяна Геннадьевна, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник 16 отдела ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Официальные оппоненты:

Бабаков Александр Владимирович, д.ф.-м.н., доцент, ФГБУН Институт автоматизации проектирования Российской академии наук (ИАП РАН), отдел информатизации, математического моделирования и управления, главный научный сотрудник, заведующий отделом;

Усачов Александр Евгеньевич, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник НИО-12 Научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ, дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО “Санкт-Петербургский государственный университет”, г. Санкт-Петербург, в своем **положительном** заключении, составленном д.ф.-м.н. **Кустовой Еленой Владимировной**, профессором кафедры гидроаэромеханики, и к.ф.-м.н. **Карпенко Антоном Геннадьевичем**, доцентом кафедры гидроаэромеханики, и утвержденным

Аплоновым Сергеем Витальевичем, проректором по научной работе, профессором кафедры геофизики, указала, что диссертационная работа Истоминой М.А. является законченной научно-квалификационной работой, вносящей заметный вклад в развитие вычислительной гидромеханики. Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842. Автор - Истомина Мария Александровна - заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 - математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертация посвящена построению новых вычислительных моделей для двух задач гидродинамики с использованием КГД алгоритма и существенному развитию указанного подхода путем включения его в широко известный открытый программный комплекс OpenFOAM.

Полученные автором результаты представляют интерес для организаций, занимающихся численным моделированием широкого круга газодинамических задач, таких как Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург), институт проблем механики РАН (Москва), институт механики МГУ (Москва), кафедру физики моря и вод суши физического факультета МГУ, институт космических исследований РАН (Москва), институт вычислительной математики РАН (Москва), институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск), Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону), вычислительный отдел Центра гидравлических исследований ОАО “НИИЭС” РусГидро (Москва), институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (Новосибирск).

Дана следующая общая оценка работы:

Соискатель имеет 6 работ по теме диссертации, опубликованных в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК (с учетом других публикаций - 10 работ):

1. Т. Г. Елизарова, М. А. Истомина, Н. К. Шелковников Формирование уединенной волны в кольцевом аэрогидроканале // Математическое моделирование, 2012, том 24, номер 4, стр. 107 - 116.
2. Е. В. Юшков, М. А. Истомина Катящиеся волны в кольцевом канале // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2014, том 54, номер 1, стр. 123-134.
3. Т. Г. Елизарова, А. А. Злотник, М. А. Истомина Гидродинамические аспекты формирования спирально-вихревых структур во вращающихся газовых дисках // Астрономический журнал, 2018, том 95, №1, с. 1-11.
4. Истомина М.А., Елизарова Т.Г. Квазигазодинамический алгоритм для полярной системы координат и пример численного моделирования неустойчивостей в аккреционном диске // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша, 2016 г., № 92, 25 с.
5. Т. Г. Елизарова, А. А. Злотник, М. А. Истомина О двумерном численном КГД моделировании спирально-вихревых структур в аккреционных газовых дисках // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2017 г., № 1, 30 с.
6. М.А. Истомина О реализации одномерного квазигазодинамического алгоритма в открытом программном комплексе OpenFOAM // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2018 г., № 1, 19 с.

В работе [1] автором впервые построена математическая модель, описывающая нелинейный процесс формирования незатухающей уединенной волны в рамках приближения мелкой воды с использованием КГД алгоритма, проведено численное моделирование. В работе [2] совместно с Е.В. Юшковым построен вариант аналитического решения этой задачи, который сопоставлен с численным решением. В работах [3, 4, 5] автором впервые построена математическая модель спирально-вихревых структур во вращающемся газовом аккреционном диске в рамках баротропных уравнений Эйлера с применением КГД подхода. Совместно с другими авторами

построены уточненные начальные условия для этой задачи. В работах [3, 5] в процессе численного моделирования автором выявлено явление раздвоения рукавов плотности и перенос углового момента. В совместных работах в рамках открытого программного комплекса OpenFOAM автором создано новое вычислительное ядро на основе КГД алгоритма (QGDFoam), доступное внешним пользователям. В частности, в работе [6] автором адаптирован КГД алгоритм в соответствии с требованиями указанного программного комплекса и проведено сравнение решателей QGDFoam и rhoCentralFoam в рамках указанного программного комплекса на примере системы одномерных тестов. Показано, что QGDFoam позволяет проводить численное моделирование широкого круга прикладных задач.

Все сведения об опубликованных соискателем работах достоверны. Общий объем публикаций в изданиях из перечня ВАК 8.6 п.л., авторский вклад соискателя 4.9 п.л.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы ведущей организации, отзывы официальных оппонентов, а также 6 отзывов на автореферат. Все отзывы **положительные**.

В отзывах содержатся следующие замечания:

В отзыве ведущей организации **ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет**:

1. В формулах 1.51, 1.54, 1.57-1.60 в правой части опущены частные производные. Вероятно, это опечатка, и далее (в уравнении 1.61) производные присутствуют, но это несколько затрудняет понимание цепочки выкладок.
2. На стр. 28 указано, что в формулах 1.70-1.71 приведена КГД система уравнений мелкой воды с плоским дном в отсутствии внешних сил и тензора Навье-Стокса. Ниже на этой же стр. сказано, что Π_{xx} является тензором вязких напряжений, что, видимо, является опечаткой. Вероятно, это член является диссипативной добавкой, связанной с выводом КГД-версии уравнений.

3. В главе 4 представлена реализация явной схемы для одномерной нестационарной КГД-версии системы уравнений Эйлера. В работе остался нераскрытым вопрос о пределах устойчивости такой схемы. Было бы полезно привести реализацию КГД схемы для простейшего гиперболического уравнений переноса, показать условия устойчивости схемы, изучить диссипативные свойства схем методами на базе первого дифф. приближения.

В отзыве официального оппонента д.ф.-м.н., доцента **Бабакова А.В.**:

1. В математической постановке задачи о гидравлическом скачке (глава 1, п.1.2.3) недостаточно ясно сформулированы предположения, используемые при выводе КГД системы уравнений в приближении мелкой воды, а именно, касающиеся условия несжимаемости среды.
2. При описании математической модели для численного моделирования формирования уединенной волны в аэрогидроканале следовало пояснить физический смысл используемых автором моделей силового ветрового воздействия и учета силы трения, которые в значительной мере определяют процесс формирования уединенной волны.
3. В рассматриваемой автором постановке при моделировании спирально вихревых структур во вращающихся газовых дисках должен выполняться закон сохранения импульса, не входящий в систему основных уравнений. Желательно контролировать выполнение этого закона для всей области интегрирования в эволюционном расчете.

В отзыве официального оппонента д.ф.-м.н., **Усачова А.Е.**:

1. Во второй главе диссертации не изложены принципы перенесения результатов численного моделирования одиночных волн на натурные условия.
2. В главе 3 при постановке задачи о вращающемся диске не совсем ясно, из каких соображений выбираются размеры расчетной области.

В отзыве на автореферат д.ф.-м.н. **Галкина Валерия Алексеевича**, профессора Политехнического института БУ ВО Ханты-Мансийского округа-Югры “Сургутский государственный университет”.

1. Для оперативного решения сложных практически важных задач из области гидродинамики и астрофизики, как правило, требуются существенные вычислительные мощности, которые на данный момент могут обеспечить лишь высокопроизводительные вычислительные системы. Разработка газодинамических программных комплексов для таких систем требует модификации классических и создания новых алгоритмов под параллельную архитектуру вычислителей. Как отмечает автор, разработанные КГД алгоритмы обладают свойством простоты и эффективности реализации на высокопроизводительных вычислительных системах, но при этом в автореферате не освещена их параллельная реализация и анализ производительности, масштабируемости и эффективности программного кода.
2. В автореферате не отражены выводы по сопоставлению разработанного вычислительного ядра QGDFoam и rhoCentralFoam.

В отзыве на автореферат д.ф.-м.н. **Исаева Сергея Александровича**, профессора кафедры механики Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации.

1. Не вполне ясно, вносились ли автором какие-то изменения в КГД-алгоритм?
2. Интересно, решались ли рассмотренные в диссертации задачи другими численными методами? Какова адекватность численных прогнозов, полученных в рамках КГД-подхода, данным физических измерений?
3. Какие прорывные научные результаты позволит введение КГД-алгоритма в коды OpenFOAM?

В отзыве на автореферат д.ф.-м.н. **Кудрявцева Алексея Николаевича**, с.н.с. лаборатории вычислительной аэродинамики ИТПМ СО РАН.

1. Говоря о моделировании образования уединенной волны в кольцевом канале, автор пишет, что “постановка задачи ориентирована на эксперимент”. Тем не менее, никаких сравнений результатов расчета с экспериментальными данными в автореферате не приведено.
2. В автореферате практически не обсуждается физический смысл решений, полученных при моделировании вращающихся газовых дисков. Означают ли, в частности, полученные результаты, что количество спиральных рукавов определяется только начальными данными, могут быть получены решения с любым их количеством и никакого механизма отбора предпочтительного количества рукавов не существует?

В отзыве на автореферат к.ф.-м.н., доцента **Белкина Александра Анатольевича**, заведующего кафедрой теоретической механики ФГБОУ ВО НГАСУ (Сибстрин).

1. На мой взгляд, в автореферате следовало бы более четко показать актуальность данной конкретной работы, а не численных методов в целом и известных программных пакетов. В абзаце на стр. 4, где сформулирована актуальность темы, я увидел скорее перечисление полученных результатов. Стоило бы подробнее остановиться на преимуществах метода квазигазодинамических уравнений, о задачах, где его применение наиболее эффективно. Исходя из этого, я бы, например, перенес информацию о волнах-убийцах из раздела о целях работы в раздел актуальности.
2. В описании результатов работы говорится о том, что новые алгоритмы позволили сократить время вычислений и проводить их на персональном компьютере. Однако конкретные результаты сопоставления эффективности по времени расчета с известными алгоритмами в автореферате не приводятся. В частности, обсуждение таких результатов для ядра QGD Foam стало бы хорошим заключением главы 4.

В отзыве на автореферат к.ф.-м.н. **Кошелева Константина Борисовича**, с.н.с. лаборатории ГГИ института водных и экологических проблем СО РАН.

1. Имеются редакционные погрешности-фраза на 7 странице “автор непосредственно участвовал в написании ядра программного комплекса OpenFOAM” может быть неверно истолкована, будто автор участвовал в разработке базового пакета OpenFOAM.
2. Результаты численного моделирования задач распада разрывов (таблица 3, рис. 7-10) свидетельствуют об отсутствии однозначного превосходства в точности расчетов с использованием решателей QGDFoam и rhoCentralFoam. За пределами рассмотрения остался анализ преимуществ и недостатков сравниваемых подходов.

В отзыве на автореферат д.т.н. **Овсянникова Владислава Михайловича**, профессора кафедры теоретической механики МГАВТ – филиала Государственного университета морского и речного флота им. Адмирала С.О. Макарова замечаний нет.

Во всех отзывах отмечается, что указанные недостатки не снижают общей ценности работы. Основные результаты работы в достаточной мере отражены в публикациях и изданиях из перечня ВАК и прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях и семинарах. Работа ясно изложена и хорошо оформлена. По актуальности решаемой проблемы, научной новизне, научной и практической значимости, достоверности научных результатов диссертация удовлетворяет требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации объясняется их широко известной компетенцией в вопросах математического моделирования задач гидродинамики и астрофизики. Это подтверждается многочисленными научными публикациями, такими как:

1. K.N. Volkov, V.N. Emel'yanov and **A.G. Karpenko** Preconditioning of Gas Dynamics Equations in Compressible Gas Flow Computations at Low Mach Numbers // Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2015, vol. 55, № 6, pp. 1051-1067.
2. Волков К.Н., Дерюгин Ю.Н., Емельянов В.Н., **Карпенко А.Г.**, Козелков А.С., Смирнов П.Г., Тетерина И.В. Реализация параллельных вычислений на графических процессорах в пакете вычислительной газовой динамики ЛОГОС // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2013. Т. 14. № 1. С. 334-342.
3. Волков К.Н., Емельянов В.Н., **Карпенко А.Г.**, Курова И.В., Серов А.Е., Смирнов П.Г. Численное решение задач гидродинамики на графических процессорах общего назначения // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2013. Т. 14. № 1. С. 82-90.
4. V.N. Emelyanov, **A.G. Karpenko**, A.S. Kozelkov, I.V. Teterina, K.N. Volkov, A.V. Yalozo Analysis of impact of general-purpose graphics processor units in supersonic flow modeling // Acta Astronautica, vol. 135, June 2017, pp. 198-207.
5. Исаев С.А., Баранов П.А., **Усачов А.Е.** Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике // LAMBERT Academic Publishing. Саарбрюкен, 2013, 316 с.
6. **А.Е. Усачов**, С.А. Исаев, С.В. Гувернюк, М.А. Зубин, П.А. Баранов Применение различных моделей турбулентности для расчета внутренних течений // Ученые записки ЦАГИ, №1, Том XLVIII, 2017, с. 26-36.
7. **А.В. Бабаков**, М.В. Попов, В.М. Чечеткин Моделирование эволюции быстровращающейся звезды на основе газодинамической модели // Математическое моделирование, 2017, т. 29, № 11, с. 131-139.

8. **А.В. Бабаков**, А.В. Белоцерковский, В.И. Гайдаенко, А.А. Дядькин
Моделирование методом потоков течения в диффузорной части регулируемого сопла тормозного двигателя возвращаемого аппарата // “Космическая техника и технология”, 2017, т. 16, № 1, с .39-47.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. **разработана** математическая модель формирования уединенной волны в рамках приближения мелкой воды и проведено численное моделирование этой волны для условий эксперимента в аэрогидроканале,

2. **разработана** математическая модель для моделирования формирования спирально-вихревых структур во вращающемся аккреционном диске с применением двумерных баротропных уравнений газовой динамики и уточненных начальных условий. **Получены** численные решения, демонстрирующие расщепление спиральных структур и перенос ими углового момента от центра диска к его периферии,

3. **разработано, оттестировано и введено** в эксплуатацию новое вычислительное ядро программного комплекса OpenFOAM, основанное на квазигазодинамическом алгоритме и позволяющее моделировать газодинамические течения в широком диапазоне чисел Маха.

Теоретическая значимость обусловлена следующими аспектами: построение новой теоретической модели для описания эффекта формирования уединенной волны в аэрогидроканале; построение соответствующего аналитического решения; построение квазигазодинамических уравнений в полярной системе координат; построение метода численного решения КГД уравнений в полярной системе координат.

Практическая значимость полученных результатов исследования подтверждается тем, что: результаты численного моделирования уединенной волны в кольцевом аэрогидроканале вносят существенный вклад в теорию образования волн—убийц; результаты численного моделирования формирования спирально-вихревых структур в аккреционных газовых дисках дают вклад в понимание возможности образования рукавов плотности и их расщепления в рамках чисто гидродинамического приближения; создание нового вычислительного ядра QGDFoam в открытом программном комплексе OpenFOAM расширяет возможности применения КГД алгоритма и позволяет его использовать и усовершенствовать широкому кругу пользователей.

Оценка **достоверности** результатов исследования выявила хорошее подтверждение результатов при их сопоставлении с аналитическим и экспериментальными данными. Достоверность численных результатов установлена при сопоставлении расчетов задач о распаде разрывов, выполненных в рамках КГД алгоритма с помощью ядра QGDFoam при его включении в открытый программный комплекс OpenFOAM, с аналитическими решениями этих задач и с помощью решения этих же задач на основе схем повышенного порядка точности rhoCentralFoam, включенного ранее в этот комплекс программ.

Личный вклад автора состоит в разработке математических моделей для задач о течении в аэрогидроканале и аккреционном диске, разработке и отладке соответствующих численных алгоритмов и программ, анализе, интерпретации и оформлении результатов расчетов. Кроме того, автор непосредственно участвовал в написании ядра QGDFoam программного комплекса OpenFOAM, его верификации на примере одномерных тестов и сопоставлении с данными, посчитанными с помощью rhoCentralFoam. Вклад соискателя состоит также в выступлениях на многочисленных международных и всероссийских конференциях, оформлении презентаций и текстов печатных статей и препринтов по результатам выполненных работ, а также рукописи диссертации.

На заседании 12 апреля 2018 г. диссертационный совет принял решение присудить Истоминой Марии Александровне ученую степень кандидата физико-математических наук. При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них - 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за - 20, против - нет, недействительных бюллетеней - нет.

Заместитель председателя

диссертационного совета Д 002.024.03

В.Ф. Тишкин

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.024.03

М.А. Корнилина

12 апреля 2018 г.